

УДК 621.3

## СИМУЛЯТОР ХАРАКТЕРИСТИК ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА БАЗЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

В.Г. Титов, С.В. Абрамов

Нижегородский государственный технический университет

E-mail: s.abramov@mail.ru

*Рассматриваются результаты разработки и исследования симулятора характеристик топливных элементов, основанного на управляемом импульсном преобразователе постоянного тока и цифровом сигнальном процессоре. В алгоритм работы процессора заложена электрохимическая модель топливного элемента, учитывающая его статические и динамические характеристики. Указанный симулятор имеет на зажимах нагрузки те же характеристики выходной мощности, что и реальная система. Это позволяет на этапах исследования, проектирования и реализации автономных систем электропитания на основе топливных элементов отказаться от использования как самих элементов, так и дорогостоящих сопутствующих систем.*

### Введение

Для обеспечения конкурентоспособности с автономными системами питания на базе хорошо известных источников электроэнергии, системы на базе топливных элементов (ТЭ) должны работать с сопоставимой эффективностью [1]. Поведение таких систем в переходных процессах — один из ключевых вопросов на этапе их проектирования [2]. Симулятор характеристик ТЭ — устройство, имеющее на зажимах нагрузки те же характеристики выходной мощности, что и реальная система моделируемый ТЭ. Для создания симулятора характеристик ТЭ необходимо создание математической модели электрохимического генератора, ориентированной на анализ системы методами теории автоматического регулирования и электротехники.

В настоящее время исследования в этой области, представленные в отечественных и иностранных источниках, можно условно разделить на два направления: первое (представленное большинством работ) — это исследования в области электрохимии, цель которых — разработка самих компонентов ТЭ (электролитов, газодиффузионных электродов и т. п.) и выбор оптимальных рабочих участков на вольтамперных, параметрических и прочих кривых. Такие модели основаны на законах электрохимии пористых структур, термодинамике и механике газообразных и жидких сред [3, 4]. Они непригодны для анализа переходных процессов в системе ТЭ методами теории автоматического регулирования и электротехники.

Другое направление — это исследования в области электроники и микропроцессорной техники, позволяющие моделировать характеристики ТЭ [5]. Однако недостаточное освещение этих вопросов в литературе привело к необходимости разработки математической модели замкнутой системы управления ТЭ, создания физического макета симулятора характеристик ТЭ с компьютерным управлением для экспериментального исследования его характеристик, а также разработки системы регулирования, позволяющей обеспечивать заданные характеристики переходных процессов.

Авторами предлагается новое устройство на базе импульсного преобразователя постоянного тока,

управляемого с помощью компьютера на основании заложенной в него электрохимической модели ТЭ (программного обеспечения). Симулятор на базе упомянутого преобразователя имеет на своих зажимах нагрузки ту же зависимость выходного постоянного напряжения от тока нагрузки, что и реальный ТЭ [6, 7].

Принцип моделирования характеристик ТЭ с помощью симулятора заключается в регулировании напряжения на нагрузке в соответствии с заложенной в ЦСП электрохимической моделью БТЭ. Формирование необходимой величины напряжения реализуется путем изменения скважности импульсов, управляющих импульсным преобразователем постоянного тока. Необходимый режим работы рассчитывается программным комплексом на основании данных от датчиков тока и напряжения. Преобразователь действует как управляемый источник постоянного напряжения, снабжающий нагрузку той же мощностью, что и реальный ТЭ.

### Модель, описывающая статические характеристики топливного элемента с протонообменной мембраной

Использованная в данной работе модель топливного элемента основана на нескольких базовых уравнениях, представленных в виде математических блоков в пакете Simulink, и имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} U_{\text{ТЭ}} &= E_{\text{Нернст}} - \Delta E_{\text{ом}} - \Delta E_{\text{акт}} - \Delta E_{\text{кон}}, \\ \text{где } E_{\text{Нернст}} &= 1,23 - 8,5 \cdot 10^{-4} (T - 298,15) + \\ &+ 4,31 \cdot 10^{-5} \cdot T (\ln P_{\text{H}_2} + 1/2 \cdot \ln P_{\text{O}_2}), \\ \Delta E_{\text{ом}} &= i_{\text{ТЭ}} \cdot R_{\text{м}}, \\ \Delta E_{\text{акт}} &= -[\xi_1 + \xi_2 \cdot T + \xi_3 \cdot T \cdot \ln P_{\text{O}_2} \cdot \xi_4 \cdot T \cdot \ln(i_{\text{ТЭ}})], \\ \Delta E_{\text{кон}} &= -B \cdot \ln(1 - J/J_{\text{max}}), \end{aligned} \right\}$$

где  $E_{\text{Нернст}}$  — напряжение холостого хода ТЭ;  $\Delta E_{\text{ом}}$  — омическое падение напряжения на внутреннем сопротивлении ТЭ;  $\Delta E_{\text{акт}}$  — падение напряжения вследствие активации анода и катода;  $\Delta E_{\text{кон}}$  — падение напряжения вследствие снижения концентрации реагирующих газов;  $i_{\text{ТЭ}}$  — ток нагрузки ТЭ, А;  $R_{\text{м}}$  — эквивалентное сопротивление мембраны, Ом;  $J$  — плотность тока нагрузки ТЭ, А/см<sup>2</sup>;  $n$  — количе-

ство ТЭ, используемых в батарее;  $T$  – температура мембраны в процессе работы, К;  $A$  – активная площадь мембраны, см<sup>2</sup>;  $l$  – толщина мембраны;  $P_{O_2}$  и  $P_{H_2}$  – парциальные давления кислорода и водорода, ата;  $R_c$  – эквивалентное контактное сопротивление мембраны, Ом;  $B$ ,  $\xi$ ,  $\psi$  – параметрические коэффициенты.

Выражение для эквивалентного сопротивления мембраны:

$$R_M = \frac{\rho_M l}{A},$$

где  $\rho_M$  – удельное сопротивление мембраны, рассчитанное по формуле:

$$\rho_M = \frac{181,6 \cdot \left[ 1 + 0,03 \cdot \left[ \frac{i_{FC}}{A} \right] + 0,062 \cdot \left[ \frac{T}{303} \right]^2 \left[ \frac{i_{FC}}{A} \right]^{2,5} \right]}{\left[ \psi - 0,634 - 3 \left[ \frac{i_{FC}}{A} \right] \right] \cdot \exp \left[ 4,18 \cdot \left[ \frac{T - 303}{T} \right] \right]}.$$

Нагрузочная характеристика (НХ) топливного элемента на рис. 1, а, представляет собой теоретическую зависимость выходного напряжения топливного элемента от тока нагрузки. В данном случае исследовалась НХ батареи ТЭ с целью сравнения с результатами эксперимента над учебным образцом Avista Labs SR-12. Представленная НХ описывает лишь статическое поведение батареи ТЭ, поскольку каждая точка кривой по оси абсцисс получена по достижении ей устойчивого значения.

На рис. 1, б, представлена экспериментальная НХ батареи ТЭ, параметры которой были взяты за основу при построении математической модели для статических режимов работы. Низкочастотные пульсации на полученном графике объясняются низкими требованиями, предъявляемыми к качеству выходного напряжения использованного в эксперименте учебного образца. Путем расчета коэффициентов корреляции теоретической и практической НХ получены коэффициенты  $k_U=0,91$  и  $k_P=0,89$  для кривых выходного напряжения и выходной мощности батареи ТЭ соответственно. Это дает основание утверждать, что сформулированная электрохимическая модель ТЭ корректно передает поведение системы в статических режимах работы с учетом принятых допущений.

Динамическое поведение ТЭ с протонообменной мембраной основано на явлении накапливания двойного слоя заряда в месте контакта электродов и мембраны. Если ток нагрузки ТЭ изменится, то заряду потребуется некоторое время для того, чтобы перераспределиться [7]. Один из наиболее простых способов смоделировать эту ситуацию состоит в использовании эквивалентной схемы (астатического звена первого порядка), в которой двойной слой заряда был бы представлен в виде конденсатора, а резисторы соответствовали бы внутренним сопротивлениям ТЭ. Схема смоделирована в пакете Simulink, и на рис. 2, а, представлены результаты.

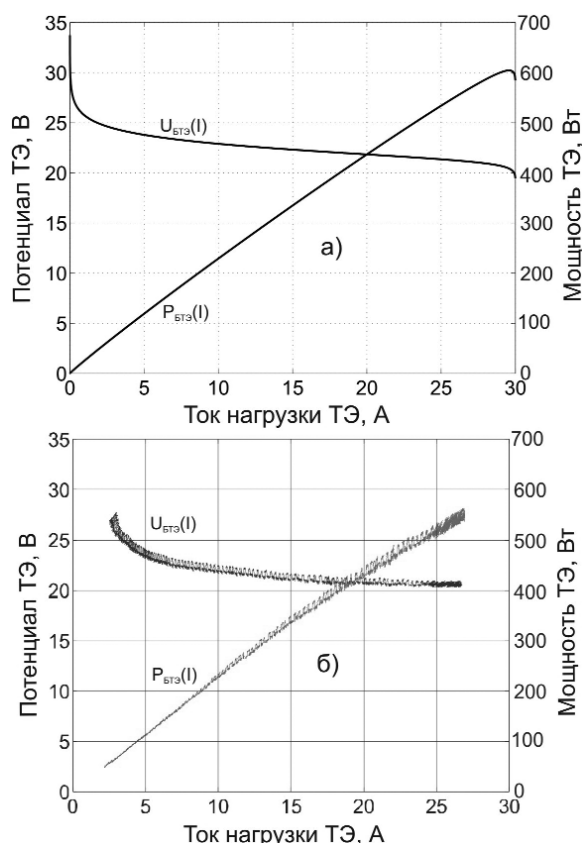


Рис. 1. Теоретическая (а) и экспериментальная (б) нагрузочные характеристики ТЭ

Допущения, принятые при построении данной модели следующие: температура ТЭ и давление реагирующих газов сохраняются постоянными в течение всего времени переходного процесса. Ток нагрузки в эксперименте изменяется скачкообразно с 0 до 25 А и обратно. Резкий провал напряжения обусловлен близкими значениями постоянных времени в передаточной функции схемы замещения. Этот провал невозможно компенсировать с помощью системы автоматического регулирования. Данный результат показывает, что для компенсации провалов напряжения ТЭ при резких скачках нагрузки необходим дополнительный источник энергии. Большая длительность переходного процесса обусловлена величиной ёмкости схемы замещения, составляющей единицы фарад. Эта ёмкость пропорциональна площади сложной пористой структуры мембраны, которая на несколько порядков превосходит ее геометрическую площадь.

На рис. 2, б, в, представлено экспериментальное полученное семейство откликов разомкнутой системы на скачкообразное изменение тока нагрузки при различных начальных и конечных значениях тока. Путем расчета коэффициентов корреляции для смоделированных и экспериментальных результатов получены коэффициенты,  $k_{\text{наброс}}=0,88$  и  $k_{\text{сброс}}=0,85$  для кривых, соответствующих набросу и сбросу нагрузки батареи ТЭ соответственно. Это дает основание утверждать, что представленная

модель для переходных режимов работы ТЭ корректно передает его поведение в динамических режимах работы с учетом принятых допущений.

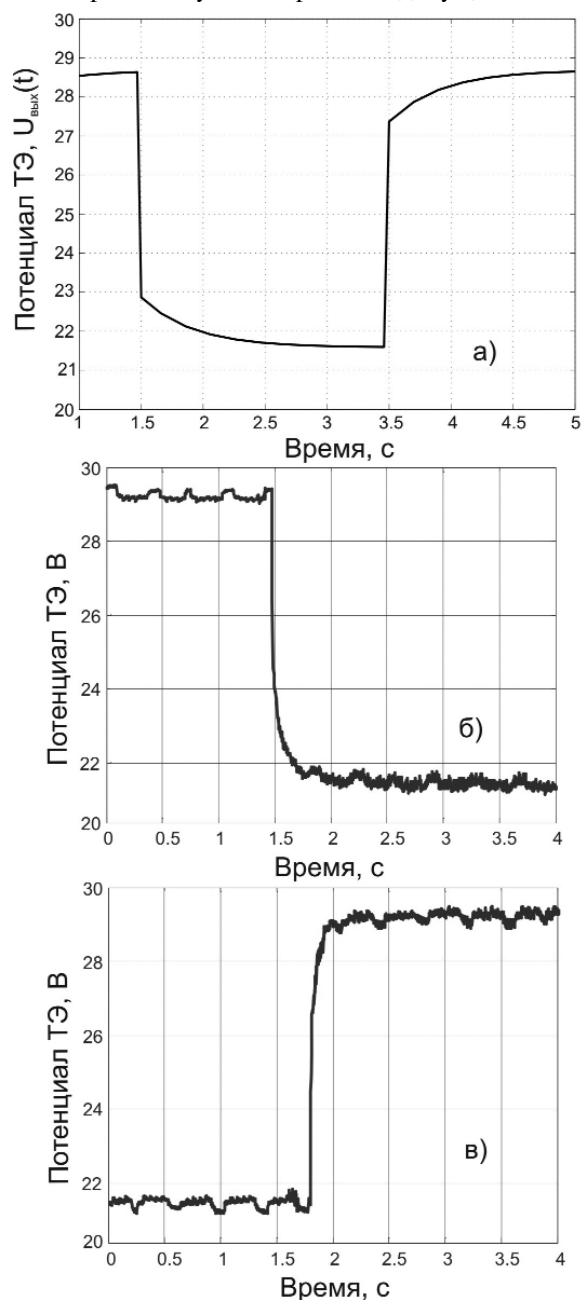


Рис. 2. Отклик системы на скачкообразное изменение нагрузки: а) смоделированный; б, в) экспериментальный

Наиболее простым способом реализации силовой части симулятора, по мнению авторов, является использование понижающего регулятора. Его преимуществами являются простая математическая модель, линейная зависимость выходного напряжения от скважности управляющих ШИМ-импульсов, возможность применения данного схематического решения для питания нагрузки мощностью до нескольких кВт.

На рис. 3, а, представлена блок-диаграмма предлагаемой конфигурации симулятора с регулятором. На этом рисунке блок ТЭПОМ (топливный

элемент с протонообменной мембраной) представляет собой электрохимическую модель ТЭ.

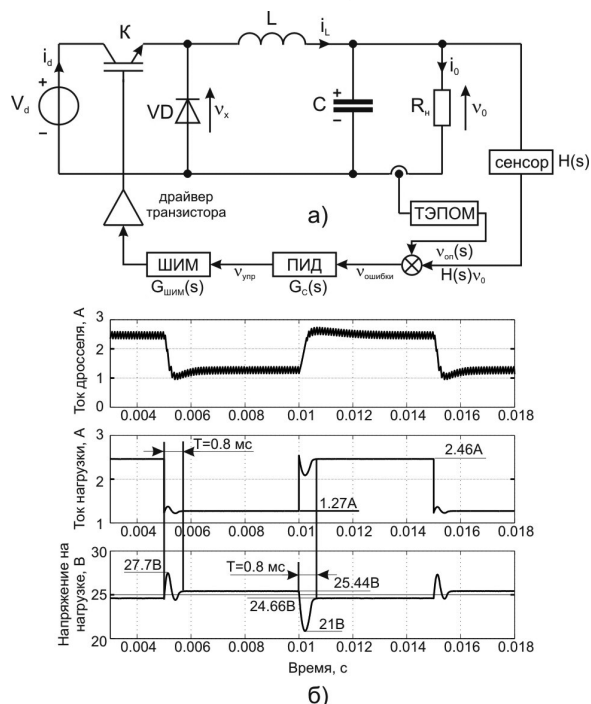


Рис. 3. Блок-диаграмма предлагаемой конфигурации симулятора характеристик ТЭ (а) и временные диаграммы поведения замкнутой системы (б)

Предложенная конфигурация симулятора была представлена в виде блока пакета Simulink и смоделирована для получения переходных характеристик системы при скачкообразном изменении тока нагрузки. Графики демонстрируют время переходного процесса менее 1 мс. После завершения переходных процессов в системе возмущение полностью подавляется, а уровни тока и напряжения нагрузки соответствуют заданным (рис. 3, б).

Для дальнейшего исследования симулятора характеристик ТЭ необходимо определить постоянные времени системы подачи воздуха в ТЭ. Они могут быть выведены аналитически, либо получены экспериментально. В качестве примера рассмотрен один из экспериментов, описанных в литературе [8]. Для определения ККП системы подачи воздуха в эксперименте была измерена скорость вращения компрессора и давление на выходе компрессора как функция сигнала задания скорости двигателя. В процессе обработки результатов эксперимента программа рассчитывает коэффициент корреляции передаточной функции с экспериментальными данными.

На основании использованных экспериментальных данных вся система была представлена в виде звеньев системы автоматического регулирования. Синтез данной модели с полученными ранее моделями, учитывающими статические и динамические характеристики ТЭ, позволил составить полную математическую модель замкнутой системы управления электрохимическим генератором, представленную аналогично в виде звеньев системы автоматического

ского регулирования (рис. 4, а). Блок, объединяющий в себе двигатель постоянного тока (ДПТ) и преобразователь, представлен на рис. 4, б.

Входным воздействием системы является сигнал задания напряжения, а выходным — измеренное напряжение на зажимах топливного элемента. С целью определения переходных характеристик синтезированной системы, она представлена в виде блоков пакета Simulink.

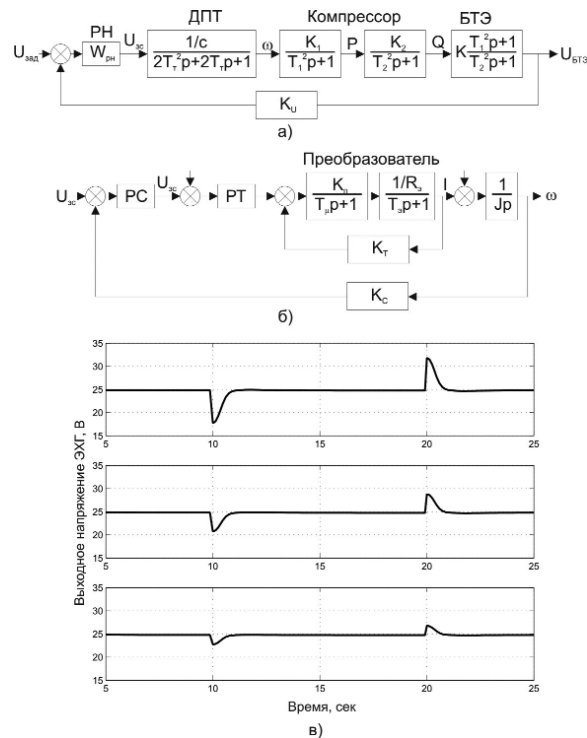


Рис. 4. Блок-схема замкнутой системы управления электрохимического генератора (а, б) и отклики системы на скачкообразное изменение тока нагрузки (в)

Результаты компьютерного моделирования приведены на рис. 4, в. В эксперименте в качестве примера смоделирован отклик замкнутой системы на скачкообразное изменение тока нагрузки. Выходное напряжение системы задается на уровне 25 В.

Первый из трех откликов системы соответствует наиболее неблагоприятному случаю, когда ток нагрузки изменяется скачком с нуля до максимального значения. При этом длительность переходного процесса составляет 1,5 с, а пиковое напряжение достигает 32 В, превышая напряжение стабилизации на 28 %. Второй и третий отклики системы соответствуют скачкам тока нагрузки с 5 до 20 А (превышение уровня стабилизации на 16 %) и с 10 до 15 А (превышение уровня стабилизации на 8 %) соответственно. Время переходного процесса во всех трех случаях остается примерно одинаковым. Выходное напряжение по истечении времени переходного процесса стабилизируется на заданном уровне.

Вышеизложенные исследования являются основой для физической реализации управления симулятора ТЭ на базе оборудования реального времени dSPACE. После того, как параметры силовой

части симулятора и компенсатора рассчитаны, проведено компьютерное моделирование поведения замкнутой системы управления, модель силовой части заменяется реальным оборудованием. Регулятор представляется в виде блоков Simulink.

В контроллер интерфейсной платы загружается алгоритм управления. Данные с датчиков тока и напряжения через аналого-цифровые преобразователи поступают в компьютер на виртуальные осциллографы. Управление установкой осуществляется через графический интерфейс пользователя. Он содержит два осциллографа для измеряемых тока и напряжения нагрузки, два осциллографа для управляющего сигнала и напряжения ошибки, а также настройки соответствующих составляющих регулятора и окно опций.

На рис. 5 показана плата управления силовыми электронными ключами, платы предварительных каскадов усиления и фильтрации измеренных сигналов экспериментальной установки. Здесь же показан выходной LC фильтр.

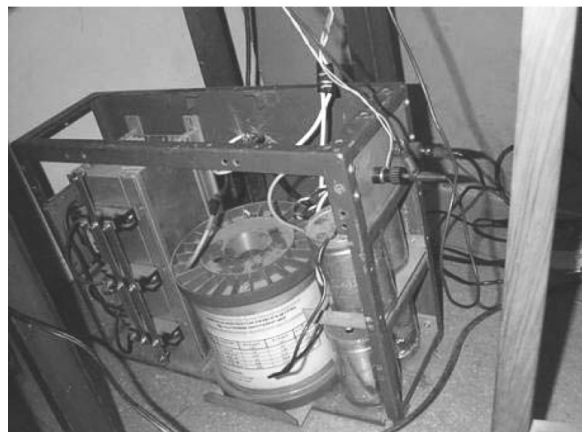
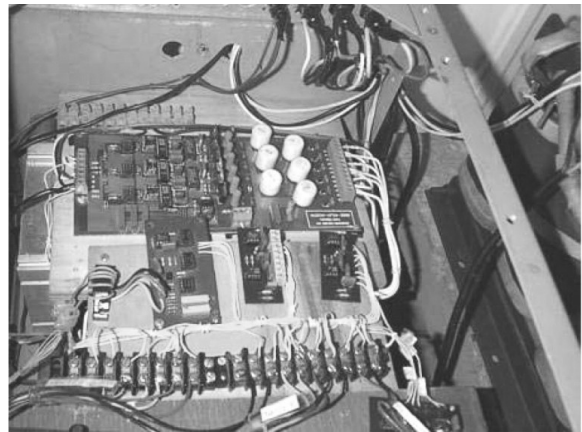


Рис. 5. Экспериментальная установка: плата управления/измерений и фильтр НЧ

В серии экспериментов (рис. 6) нагрузка изменяется скачкообразно. Графики соответствуют малому изменению тока нагрузки (от 1,5 до 2,5 А и обратно) в окрестности рабочей точки, выбранной при расчете регулятора.

Сравнивая полученные характеристики с представленными результатами компьютерного модели-

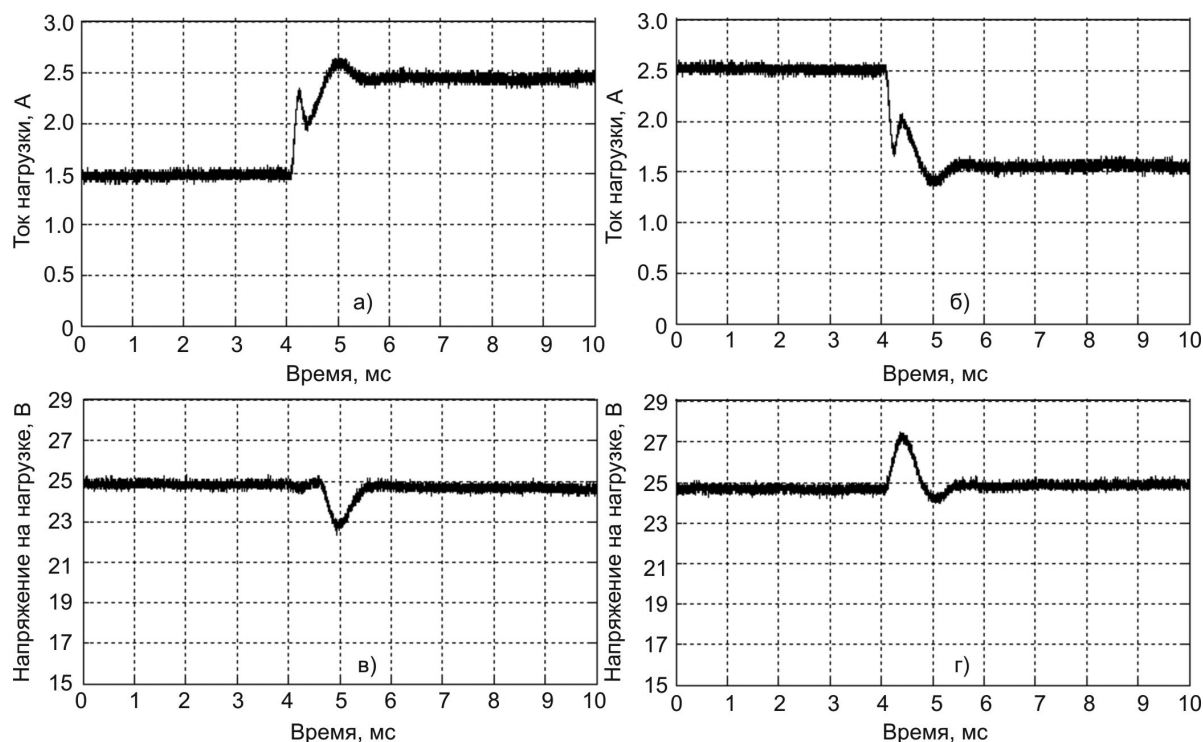


Рис. 6. Временные диаграммы симулятора характеристик ТЭ при скачкообразном изменении нагрузки

рования, можно отметить, что перерегулирование по току здесь также отсутствует, а перерегулирование по напряжению не превышает 10 %. Таким образом, результаты эксперимента согласуются с данными, полученными в ходе компьютерного моделирования. Время переходного процесса в ходе эксперимента составило менее 2 мс, что немного превышает предсказанную величину, большей частью по причине аналого-цифрового и обратного преобразований, вносящих задержку в цепь управления.

#### Выводы

1. Разработаны математические модели, учитывающие статические и динамические свойства топливных элементов, применимые к широкому кругу этих устройств, и предназначенные для

использования в составе замкнутой системы управления симулятором характеристик топливных элементов.

2. Разработана замкнутая система управления электрохимическим генератором. Проведен компьютерный анализ переходных процессов на выходных зажимах устройства.
3. Разработано и реализовано в виде макета новое полупроводниковое преобразовательное устройство — симулятор характеристик топливных элементов.
4. Предложено схемотехническое решение преобразователя мощности топливных элементов с аккумулятором мощности, поток которой регулируется в соответствии с данными с датчиков выходного тока и напряжения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов С.В. Преобразователь мощности для системы электропитания на основе топливных элементов // Актуальные проблемы электроэнергетики: Матер. XXIII научно-техн. конф. — Нижний Новгород, 15 декабря 2004. — НГТУ, 2004. — С. 30–31.
2. Абрамов С.В., Вагин Г.Я., Титов В.Г. Особенности построения автономной системы электропитания на базе батареи топливных элементов // Состояние и перспективы развития электротехнологии: Матер. Междунар. научно-техн. конф. (XII Бенардосовские чтения), Иваново, 1–3 июня 2005 г. — Иваново, 2005. — 179 с.
3. Кулешов Н.В., Григорьев С.А. Моделирование процессов в мембранно-электродном блоке топливного элемента с твердым полимерным электролитом // Вестник МЭИ. — 2003. — № 5. — С. 120–124.
4. Larminie J., Dicks A. Fuel cell systems explained. — John Wiley & Sons, 2000. — 560 p.
5. Zhu H., Kee R. A general mathematical model for analyzing the performance of fuel cell membrane-electrode assemblies // Journal Power Sources. — 2003. — № 4. — P.124–136.
6. Свид. на ПМ 39973 РФ. Симулятор характеристик батареи топливных элементов / С.В. Абрамов. Заявлено 10.04.2004; Оpubл. 10.06.2004, Бюл. № 23. — 4с.: ил.
7. Tsyppin M., Baranov I., Lizunov A., Samoilov D., Fateev V. Research and performance improvement of PEMFC electrode // Proc. of 14<sup>th</sup> Intern. Congress of Chemical and Process Engineering. — Praha, Czech Republic, 27–31 August 2000. — Praha, 2000. — P. 61.
8. Bird J.P. Model of the Air System Transients in a Fuel Cell Vehicle // Proc. of Virginia Polytechnic Institute and State University. — Virginia, 2003. — V. 2. — P. 102–114.

Поступила 16.05.2007 г.